

台風 9426 号による高潮について

吉岡 洋・山下 隆男・中村 重久・芹澤 重厚・
土屋 義人

THE STORM SURGE INDUCED BY TYPHOON 9426

By *Hiroshi YOSHIOKA, Takao YAMASHITA, Shigehisa NAKAMURA,*
Shigeatsu SERIZAWA and Yoshito TSUCHIYA

Synopsis

Using the Storm Surge Observation Tower (DPRI, Kyoto Univ.) built at the mouth of Tanabe Bay facing Kii Channel, we observed the sequential data of wind, wave, sea level and water temperatures during the storm condition of typhoon 9426 which had almost same course as Isewan typhoon (1959) and made the biggest storm surge in Ise Bay (A maximum sea level rise of 150 cm). The wind data observed at the tower was available to give reliable parameters for numerical model of storm surge. We also analyzed tidal records from Kyushu to Chubu district observed by Japan Meteorological Agency and local governments.

It was made clear that forerunners over 20 cm in height were detected at all tidal observation points, which started 2 days before the typhoon landing. Numerical simulations of sea level changes gave a good agreement with observation which was subtracted the forerunner.

1. 緒 言

高潮の予知法の開発は、沿岸海洋域の開発や防災対策上、極めて重要な研究課題であるが、最近の観測技術や数値モデルの進歩の割には、高潮現象に対する理解が深まっているとは思えない。高潮がどの程度、長波として近似できるのかという単純な疑問から、吹送流場の準3次元特性、波浪と高潮の相互作用、黒潮と外洋高潮との相互作用、陸上地形に影響された台風時の海上風の分布、高潮による沿岸海域の海水混合過程など、未だ十分解明されていない多くの課題がある¹⁾。

このため、防災研究所白浜海象観測所は、1971年に紀伊水道に面した和歌山県の田辺湾湾口南端部に設置された白浜海洋観測塔を使用して、沿岸海象の長期観測を実施しており、とくに、台風来襲時には強風高波浪状態の異常海象を観測してきた²⁾。さらに、1993年9月に田辺湾の湾口の中心に田辺中島高潮観測塔が設置され、沿岸海上固定観測地点にとどまらず、関連する観測施設と協力して、高潮現象を広域的な時空間で捉えて、その数値予測モデルと結合させたハイブリッド観測網のキーステーションとして、観測研究が推進されている。

一方、防災研究所海岸災害部門においては、高潮の数値モデルの開発が進められ、それを用いて台風7916号による大阪湾・紀伊水道の高潮³⁾、台風9119号による瀬戸内海の高潮⁴⁾や1991年のバングラデシュの高潮⁵⁾の力学的な究明に適用された。しかし、数値計算による高潮の予知の精度をもっと向上させ

るためには、外洋に面した開境界条件や水面と海底の境界条件および渦動粘性係数の分布などを、現地観測結果に基づいて適切なものにしなければならない。そこで田辺湾において、季節風の吹き出しなどをねらって、数回流速の鉛直分布を求める観測が行われ、数値モデルとの比較検討が行われてきた^{6,7)}。

高潮観測塔を設置後、1994年秋に台風9426号による最初の高潮観測を実施することができた。この台風は、勢力が強い状態を保ったまま四国紀伊半島に接近し、北緯32度に達してから加速して、1994年9月29日19時半頃、紀伊半島南部(白浜と潮岬の間)に上陸した。このコースは伊勢湾台風とほぼ同じで、大阪湾よりも伊勢湾に顕著な高潮を引き起こした。高潮観測塔では、海上風、波浪、潮位、水温などの変動が観測され、独立に設置してある潮位計により、田辺湾周辺3地点の潮位変動が観測された。さらに、伊勢湾から紀伊半島、大阪湾、四国南岸にいたる海岸の潮位、風速、波浪の観測記録を収集解析するとともに、それらの観測データを援用して、大阪湾・紀伊水道の高潮の数値シミュレーションを行った。

2. 高潮観測と検潮記録収集

田辺中島高潮観測塔は1993年9月27日、紀伊水道に面した和歌山県田辺湾の湾口部に設置された。水深約30mの平坦な海底に囲まれた急峻な礁の上(水深10m)に設置されているので、海上風、潮流、風波がほとんど地形の影響を受けずに塔に達する。従って、紀伊水道に台風が襲来した場合は、高潮の観測に最適の海上固定観測施設である。

塔本体には気温、露点などの気象測器や、潮位、水温、塩分などの海洋測器が取り付けられるが、風、波および流れは塔から離して計測する必要がある。そこで海上風の計測用に塔から5m離して海上風観測柱が、また標識灯檣のうゑに観測用マストが取り付けられ、そこで風が測られる。波は通常は塔本体から4m離れたテラスで計測しているが、いずれ、波や流れは塔から30mはなれた場所の海底に測器を設置し、信号を塔の計測室に取り込むようにする。

観測塔はFig. 1に示すように、鋼製で、直径2mの鋼管に支えられた観測室とその屋上の太陽電池パネルおよび観測檣を兼用した標識灯、観測用支柱から構成され、観測室床面下の鋼管内には蓄電池室(12V, 6000AH)が設けられている。観測塔の基部は水深10mの礁の頂上にあり、そこから観測塔最頂部(海面上23m)まで33mの高さがある。観測室は平均海面上12.5mの高さにあり、発電室および計測室に分かれている。塔の設計波浪は波高14.8m、周期15sであり、これは紀伊水道沿岸海域での再現期間約百年の波浪に相当している。観測用電力は、通常時には太陽電池によってDC12V, 200Wが供給され、これによりルーチン観測が維持される。高潮等の集中観測時には多くの計器を配置してより大電力を必要とするので、ディーゼル発電機(AC100V, 3.5KW)が設置されており、3日間の連続稼働が可能である。観測塔と白浜海象観測所本館とはテレメーター(400MHz, 4800/1200bps)によって交信することができ、通常は観測所から観測塔の設備のモニタリングや観測データの取り込みを行い、集中観測時には発電機や計測装置の稼働停止を遠隔操作する。観測塔では通常観測として、気温、露天温度、平均風向、平均風速、潮位、波高、水温を計測している。また潮岬風力実験所との共同観測として、超音波風速計が海面上20mの高さに設置され、海上風の乱れを通年にわたって計測している。

一方、台風シーズン中に、超音波式流速プロファイラー(ADCP)を観測塔から約300m西方の水深32mの海底に設置して、平均流の鉛直分布を求め、また観測塔から30m西方の水深10mの海底に電磁流速計を設置して、高波浪時の乱れを求める計画であったが、いずれも測器不調のため記録を得ることに失敗した。そのため、本台風時には、空中発射式超音波波高計(株式会社カイジョー)1台、水中発射式超音波波高計1台および既設の波高計(空中発射式超音波波高計:ケネック)による観測が行われた。

田辺湾沿岸では、細野浦湾に気象庁の検潮所(白浜)があるが、湾全体の振動特性を調べるために、台風シーズン中に他の3カ所(南部、江川、新庄)に記録内蔵型ポータブル潮位計を設置した。また白浜海

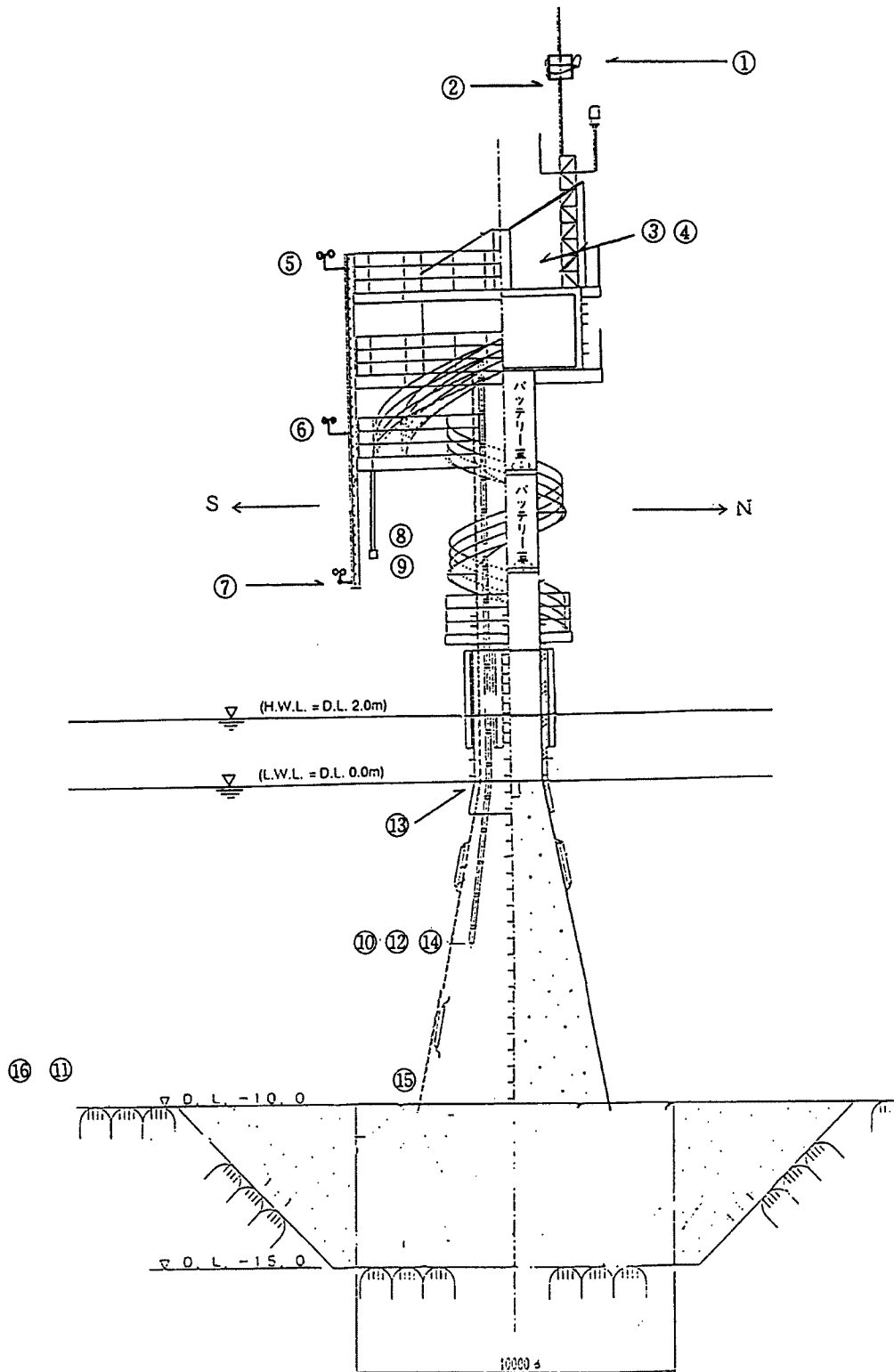


Fig. 1. Schematic Diagram of Storm Surge Observation Tower. Numbers indicate instruments listed in Table 1

象観測所において気圧を計測し、白浜海象観測塔においても風向、風速、波高、水温を観測して、沖の高潮観測塔と比較観測を実施している (Fig. 2)。

台風 9426 号は高潮観測塔設置以来最初に白浜を直撃した台風であったが、観測塔は一部手すりや上げ蓋および臨時に取り付けた波高計が波に打たれて損傷した他は、すべて正常に稼働した。以上の観測項目

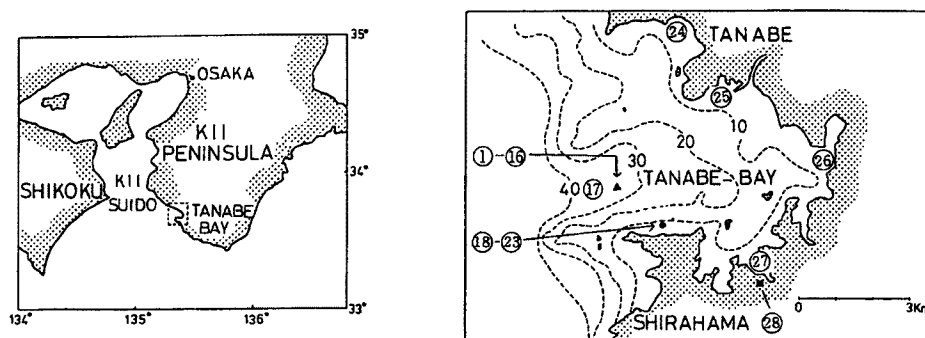


Fig. 2. Location of Storm Surge Observation Tower (▲), Shirahama Oceanographic Tower (●) and Shirahama Oceanographic Observatory (■). Numbers indicate facilities listed in Table 1

Table 1. List of observation facilities and instruments

No. at Figure 1, 2	Height
Storm Surge Observation Tower	
1 Wind Velocity (3 Component Ultra Sonic Anemometer)	20 m * 1
2 Wind Speed + Wind Direction (Aero-vane type)	20 m
3 Air Temperature	15 m
4 Dew Point	15 m
5 Wind Speed (3 Cup Anemometer)	15 m
6 " (")	10 m
7 " (")	6 m
8 Wave Height (Ultra Sonic Wave Gage : Air Born Type)	6 m
9 " (" : ")	6 m * 2
10 " (Pressure Wave Gage)	- 5 m
11 " (Ultra Sonic Wave Gage : Sea Born Type)	- 10 m * 2
12 Tide (Pressure Type)	- 10 m
13 Water Temperature	- 2.5 m
14 " (")	- 5 m
15 " (")	- 10 m
16 Current + Wave Height (Electro-Magnetic Current Meter + Pressure)	- 10 m * 3
17 Current Profile (ADCP)	- 32 m * 3
Shirahama Oceanographic Tower	
18 Wind Direction	12 m
19 Wind Speed	12 m
20 Air Temperature	6 m
21 Water Temperature	- 3 m
22 Wave Height (Pressure Type)	- 3 m * 3
23 Tide (")	- 3 m * 3
Tanabe Bay Coast	
24 Tide at Minabe (Pressure Type)	
25 Tide at Egawa (")	
26 Tide at Shinjo (")	
27 Tide at Shirahama (Float type)	* 4
28 Air Pressure at Shirahama Oceanographic Observatory	

* 1 provided by SHIONOMISAKI WIND EFFECT LABORATORY, DPRI

* 2 provided by KAIJO CORPORATION

* 3 failed to get record

* 4 managed by JAPAN METEOROLOGICAL AGENCY as SHIRAHAMA TIDAL STATION

とその測得結果を **Table 1** にまとめて示す。

また、台風の通過に伴う、異常潮位や高潮の広域特性を把握するため、高潮発生海域を被う広範囲 (**Fig. 3**) の検潮記録、波浪資料を収集して、**Table 2** に示すようなデータベースを作成した。

Table 2. List of Tidal Stations

No.	STATION	PERIOD	INTERVAL	REFERENCE
1	ISHIGAKIJIMA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
2	NAHA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
3	MAKURAZAKI	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
4	ABURATSU	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
5	TOSASHIMIZU	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
6	KOCHI	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
7	MUROTOMISAKI	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
8	KOMATSUJIMA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
9	SUMOTO	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
10	KOBE	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
11	OSAKA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
12	TANNOWA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
13	WAKAYAMA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
14	SHIRAHAMA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
15	SHIONOMISAKI	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
16	URAGAMI	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
17	OWASE	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
18	TOBA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
19	NAGOYA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
20	OMAEZAKI	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
21	OOSHIMA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
22	CHOUHI	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
23	TITIJIMA	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	気象庁
24	SAGA	9/26 0: 0~10/ 2 8: 0	60	高知県中村土木事務所
25	SIMODA	9/26 15: 0~10/ 2 23: 0	60	高知県中村土木事務所
26	SUKUMO	9/26 0: 0~10/ 2 23: 0	60	高知県宿毛土木事務所
27	SUZAKI	9/26 0: 0~10/ 3 10: 0	60	高知県須崎土木事務所
28	KOUCHI	9/03 0: 0~10/ 3 11: 0	60	高知河港事務所
29	HIWASA	9/21 0: 0~10/ 6 15: 30	30	徳島県日和佐土木事務所
30	TATIBANA	9/26 0: 0~10/ 2 0: 15	5	徳島県阿南土木事務所
31	AKASHI	9/26 0: 0~10/ 3 8: 0	60	兵庫県加古川土木事務所
32	AMAGASAKI	9/25 15: 0~10/ 3 8: 0	60	兵庫県尼崎港管理事務所
33	FUTAMI	9/26 0: 0~10/ 3 10: 0	60	兵庫県加古川土木事務所
34	NISINOMIYA	9/26 0: 0~10/ 3 9: 0	60	兵庫県尼崎港管理事務所
35	TAKASAGO	9/26 0: 0~10/ 3 11: 0	60	兵庫県加古川土木事務所
36	NUSIMA	9/21 0: 0~10/ 5 23: 0	60	気象協会神戸支部
37	HANNAN	9/26 0: 0~10/ 2 23: 30	30	大阪府阪南工事事務所
38	SAKAIKOU	9/26 0: 0~10/ 3 23: 0	60	大阪府港湾局
39	OSAKAKAIJOU	9/21 0: 0~10/ 4 23: 0	60	大阪市大阪港波浪観測塔
40	MATUSAKA	9/26 0: 0~10/ 3 9: 00	60	三重県松阪土木事務所
41	YOKKAITI	9/29 0: 0~10/ 1 11: 0	60	四日市港管理組合
42	ISSIKI	9/27 0: 0~10/ 3 1: 50	10	愛知県岡崎土木事務所
43	MIKAWA	9/26 0: 0~10/ 2 5: 0	60	愛知県三河港務所
44	MOROSAKI	9/26 0: 0~10/ 2 23: 0	60	愛知県半田土木事務所
45	ONISAKI	9/25 0: 0~10/ 1 23: 0	60	愛知県半田土木事務所
46	TENPAKU	9/26 0: 0~10/ 3 0: 0	60	愛知県名古屋土木事務所
47	Storm Surge Observation Tower		1	防災研究所白浜海象観測所
48	MINABE	9/27 14: 31~10/11 15: 20	1	防災研究所白浜海象観測所
49	EGAWA	8/26 14: 09~ 9/30 11: 50	1	防災研究所白浜海象観測所
50	SHINJO	8/29 13: 18~ 9/30 11: 51	1	防災研究所白浜海象観測所

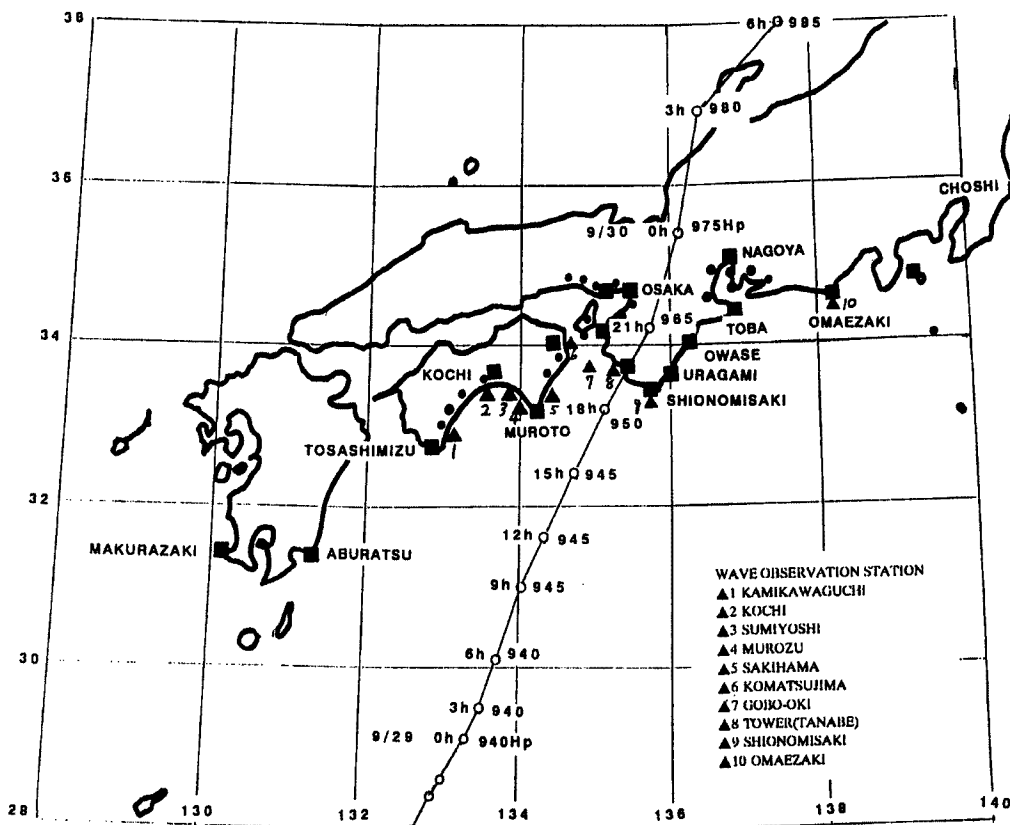


Fig. 3. Tracks of Typhoon 9426 and location of tidal stations (●) and wave observation stations (▲)

3. 観測結果に基づく高潮の特性

今回解析した観測データは、田辺湾の高潮観測塔を中心として防災研究所白浜海象観測所、海岸災害部門、潮岬風力実験所、株式会社カイジョーによって実施された共同観測による気象、海象観測資料と、九州から関東にいたる多数の検潮所から収集した潮位資料、波浪観測所から収集した波の資料、および気象台の気圧、風の資料である。白浜海象観測所においては2つの観測塔（白浜海洋観測塔、田辺中島高潮観測塔）による観測を実施しているが、今回の高潮観測はおもに高潮観測塔によって実施された。

3.1 観測塔を中心とした観測結果

台風が19時30分頃白浜の南で上陸したため、観測塔における風も19時から20時にかけて風速が最大（平均風速で22 m/s）になるとともに、風向が東から西に北回りで変化した（Fig. 4）。この時、観測塔の3杯風速計の風速が急激に減少して、あたかも台風の目に入ったように見えたが、これは3杯の風速計が北風の場合に塔本体の陰になるためであり、塔の最上部に設置した風向風速計や超音波風速計では風速の極小変化は起こらない。なお、海上風についての解析結果は別紙⁸⁾で紹介する。

観測塔の波高は17時に最大（有義波高5 m、周期15秒）に達し、その後、風が最大になる前に急激に減少した。また風がまだ強くなる前の10-11時に波高が4 mを越す極大変化が見られた（Fig. 5）。

水温は強風高波浪時は顕著な変化は示さなかったが、台風一過の9月30日に顕著な内部潮汐が発生し

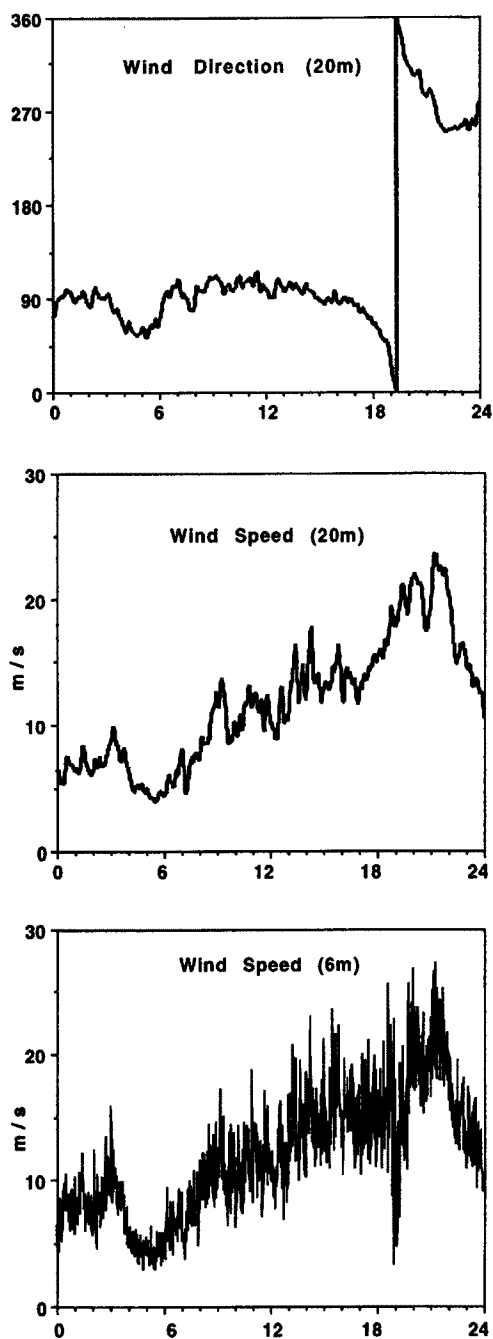


Fig. 4. Data of wind direction and speed observed at Tower during the storm of Typhoon 9426.

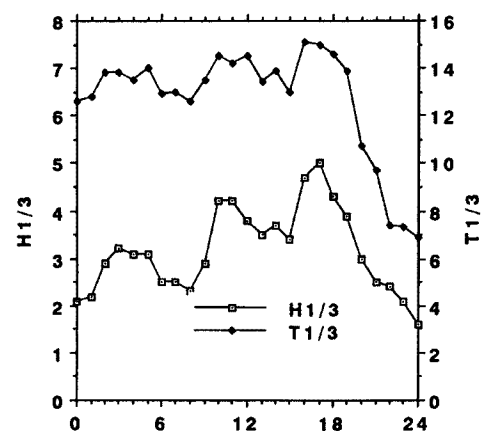


Fig. 5. Data of significant wave height and period observed at SSOT during the storm of Typhoon 9426.

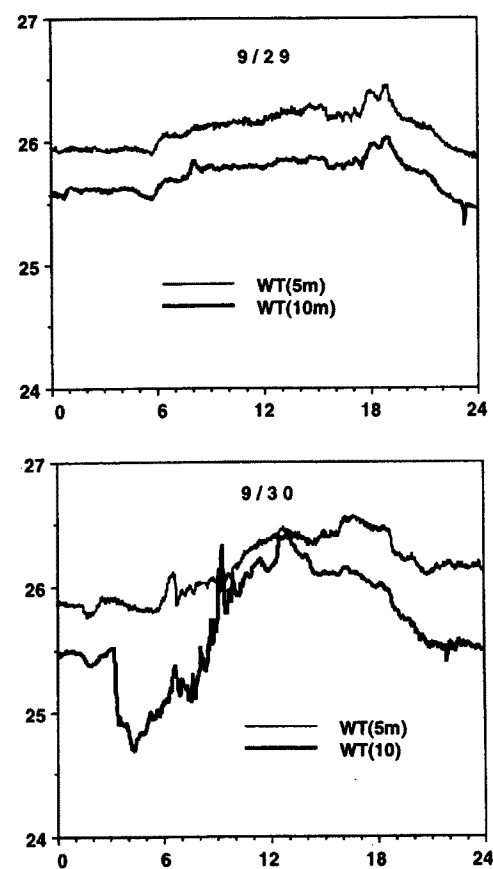


Fig. 6. Water temperature variations at the depth of 5 and 10 m during the storm (9/29) and after the storm (9/30), observed at Tower.

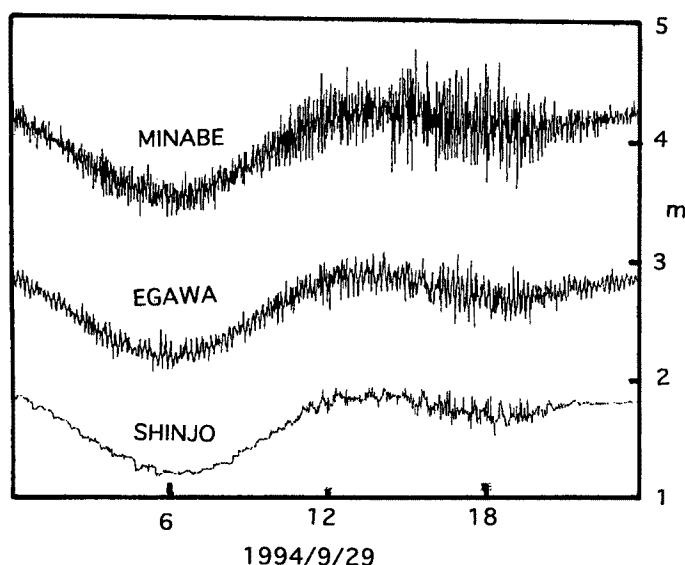


Fig. 7. Records of sea level around Tanabe Bay during the storm of Typhoon 9426.

た (Fig. 6)。これが高潮の影響か不明であるが、高潮による海水交換を考えると、内部モード的な流動の重要性を示唆すると思われる。

観測塔および田辺湾沿岸の水位変動を Fig. 7 に示す。強風が東風なので田辺湾では吹き寄せが押さえられ、しかも台風上陸時がほぼ干潮時のため、田辺湾全体の水位上昇は目立たない。一方、強風による湾内振動は顕著に発達し、特に南部では10分程度の振動が卓越している。Fig. 8 に示す29日の潮位のパワースペクトルを見ると、白浜では40分と10分の静振が卓越しているがそれより高周波数域では急激に減衰しているのに対し、観測塔では顕著な静振はみられず、高周波数域の減衰はゆるやかである。さらに南部、江川、新庄では、さまざまな静振のピークが卓越し、高周波成分は減衰していない。

静振のピークの違いは測定地点の水理的な特性を表している。たとえば、田辺湾内では40分と10分の静振が起これ、沿岸の江川、新庄、白浜では40分と10分のピークが現れるが、湾口中央部の観測塔は静振の節に位置しているのでピークが顕著でないし、隣の南部湾では別の周期の静振が卓越している。なお、高周波数域の減衰の相違は観測測器のローパスフィルターの違いによる。白浜は本格的な検潮所であり、暴風時でも波浪は完全に除去されている。観測塔は明星電気社製の水晶型圧力式水位計の潮位成分（時定数約2分のローパスフィルターを通した出力）であり、通常は問題はないが、9月29日のような高波浪時は波浪の影響がでてくる。他の3点はローパスフィルターがさらに弱く（時定数約10秒）波の影響がもっと大きい。今後、高波浪時の潮位観測を実施する際には、測器のフィルターを強化するか、記録のサンプリングを短くする必要があると考えられる。

3.2 広域的な高潮の特性

Table 3 に台風9426号による、高潮、高波浪、強風の広域的な発生状況を示す。台風進路の東側に当たる伊勢湾では、1mを越す高潮が発生したが、西側の大阪湾では1m以下にとどまった。風も地形により東風が収束強化された室戸岬を除けば、東側が西側より全体に強かった。

土佐湾から紀伊水道、遠州灘にいたる沿岸における有義波高の変化を Fig. 9 に示す。和歌山県の潮岬や御坊沖、高知県の佐喜浜では有義波高で8m以上と観測塔の1.5倍以上の値が記録され、高知県沿岸では大きな波が来襲して、港湾施設などに被害を与えた。今回の台風の経路からして、高知県沿岸では沖から来襲したうねりと沿岸海域の風波が重なって波の発達を促したのに対し、観測塔では来襲したうねりと風

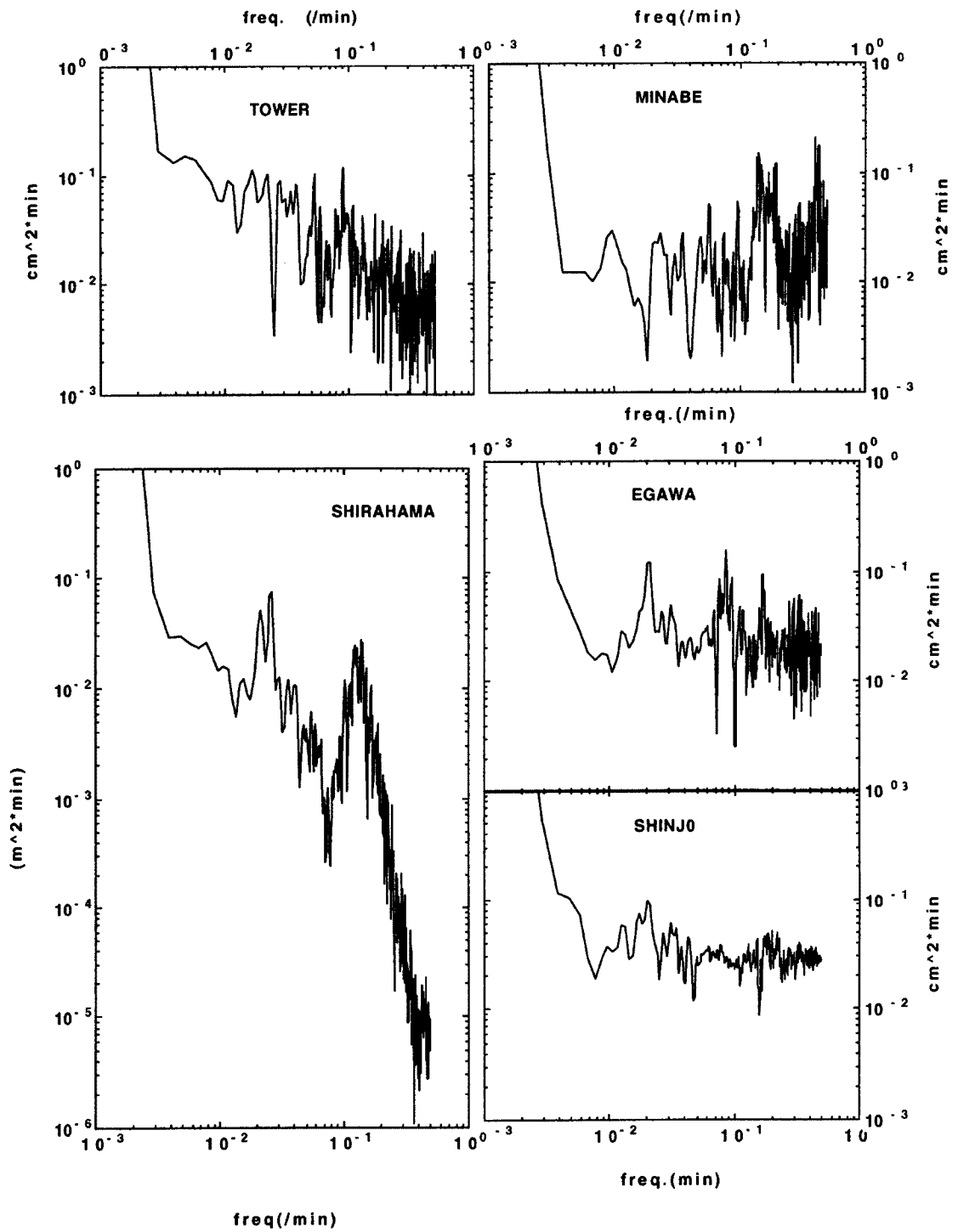


Fig. 8. Power spectra of sea level data around Tanabe Bay during the storm of Typhoon 9426

Table 3. List of Anomaly, Maximum Wind speed and Significant Wave Height caused by Typhoon 9426

STATION	ANOMALY	WIND SP., DIR. (Maximum Wind)		WAVE HEIGHT (Significant Wave)
OMAEZAKI	24 cm (9 / 29 21 h)	16.6 m/s S	(9 / 30 1 h 30 m)	3.86 m 11.4 sec (9 / 30 0 h)
MAISAKA	100 cm (9 / 30 2 h)	12.4 m/s SE	(9 / 29 22 h 20 m)	
NAGOYA	152 cm (9 / 30 0 h)	19.4 m/s SSE	(9 / 30 0 h 10 m)	
TOBA	70 cm (9 / 30 0 h)	22.7 m/s S	(9 / 29 21 h 50 m)	
OWASE	83 cm (9 / 29 21 h)	21.4 m/s E	(9 / 29 19 h 40 m)	
URAGAMI	85 cm (9 / 29 19 h)			
SHIONOMISAKI	80 cm (9 / 29 20 h)	25.1 m/s SE	(9 / 29 18 h 40 m)	9.07 m 13.7 sec (9 / 29 20 h)
---- Typhoon Landing -----				
SHIRAHAMA	65 cm (9 / 29 20 h)	20.8 m/s W	(9 / 29 21 h)	5.00 m 15.0 sec (9 / 29 17 h)
GOBO-OKI				7.90 m 12.5 sec (9 / 29 15 h)
OSAKA	62 cm (9 / 29 23 h)	15.5 m/s WSW	(9 / 30 1 h 20 m)	
TANNOWA	50 cm (9 / 29 23 h)	15.5 m/s WSW	(9 / 30 1 h 20 m)	
KOMATSUJIMA	40 cm (9 / 29 18 h)	11.9 m/s WNW	(9 / 29 21 h 40 m)	2.50 m 7.0 sec (9 / 29 18 h)
MUROTO	48 cm (9 / 29 14 h)	36.9 m/s ENE	(9 / 29 14 h 50 m)	6.61 m 11.8 sec (9 / 29 13 h)
KOCHI	47 cm (9 / 29 17 h)	6.7 m/s N	(9 / 29 16 h 00 m)	5.39 m 12.5 sec (9 / 29 15 h)
TOSASHIMIZU	42 cm (9 / 29 13 h)	13.7 m/s NNE	(9 / 29 7 h 30 m)	5.96 m 13.7 sec (9 / 29 14 h)
ABURATSU	44 cm (9 / 29 11 h)	19.0 m/s NE	(9 / 29 16 h 50 m)	
MAKURAZAKI	34 cm (9 / 29 10 h)	15.0 m/s NNW	(9 / 29 03 h 00 m)	

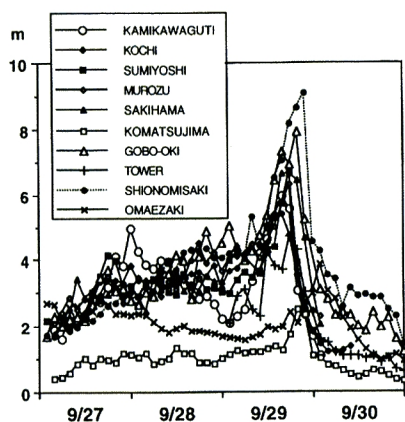


Fig. 9. Distributions of significant wave heights during the storm of Typhoon 9426

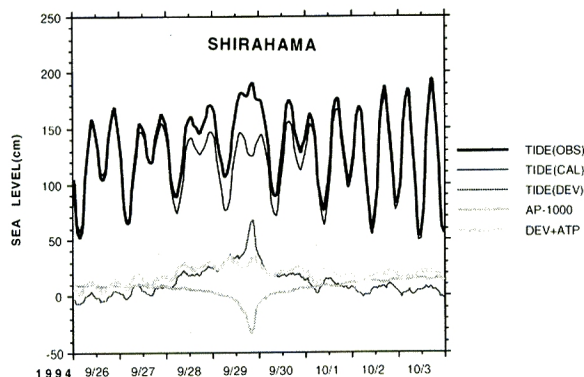


Fig. 10. Observed (OBS) and astronomical tides (CAL), the anomaly (DEV), atmospheric pressure (AP-1000), and anomaly adjusted with atmospheric pressure (DEV+ATP) at Shirahama.

波とが波の発達を抑える傾向にあったので、このような差が生じたのであろう。

Fig. 10 に白浜の観測潮位 (OBS), 予想潮位 (CAL), 潮位偏差 (DEV) および気圧 (Ap) の変化を示す。9 月 29 日に 60 cm 程度の高潮が起こったが、前日から 20 cm 以上の水位上昇が見られる。これは forerunner と呼ばれる高潮の前駆現象であり、今回の白浜の高潮は気圧補正をすると forerunner の成分しか残らない。すなわち、今回の田辺湾の高潮は気圧による吸い上げと forerunner が卓越しており、風による吹き寄せ効果は小さかったことがわかる。今回の高潮の時空間分布を調べるために、沖縄から銚子に至る太平洋沿岸の潮位偏差を比較すると、Fig. 11 に示すように、西は枕崎から東は御前崎まで広い範囲に出現しているが、気圧補正をすると、名古屋、尾鷲など、伊勢湾から熊野灘にかけてのみ顕著な高潮がみられるが、それ以外は forerunner しかみられない。すなわち、forerunner は高潮本体に比べて広範囲、長期間の現象である。forerunner の時空間変化をみるために、気圧補正した潮位偏差に半日のランニングミ

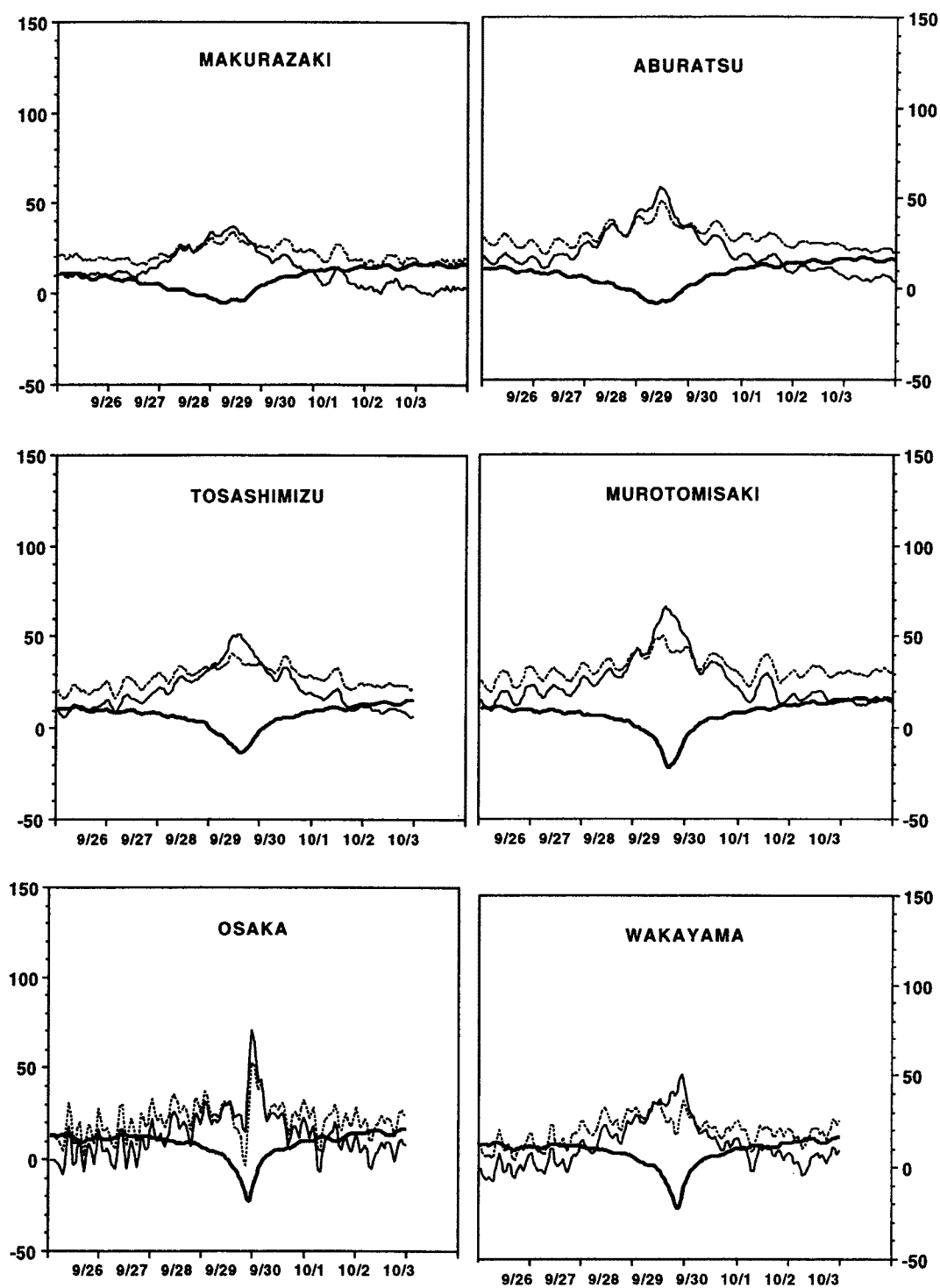


Fig. 11. Anomaly (solid line), atmospheric pressure (bold line), and anomaly adjusted with atmospheric pressure (dotted line) at the coast from Kyushu to Chubu District.

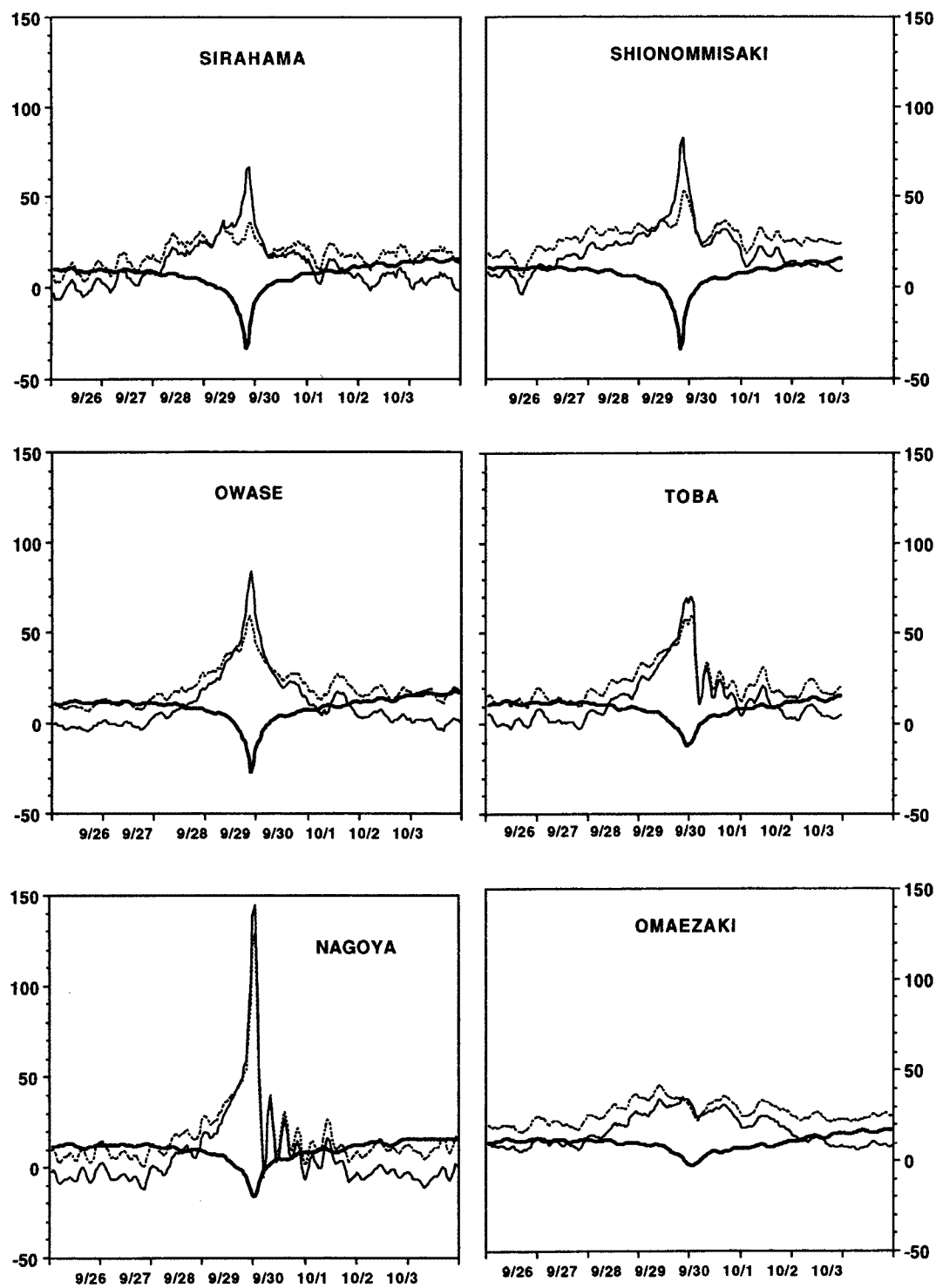


Fig. 11 (b).

ンをかけて西から順に並べたものが Fig. 12 である。forerunner だけをみると、白浜がもっとも卓越しており、出現時期も白浜、潮岬が最初であり、そこから東西に伝わっている。

沿岸潮位にしばしばみられる 10 日前後の中規模水位変動が黒潮の流路変化と関係していることがいくつか報告されているので⁹⁾、今回の forerunner も黒潮の影響と考えている。すなわち、この時期は黒潮が

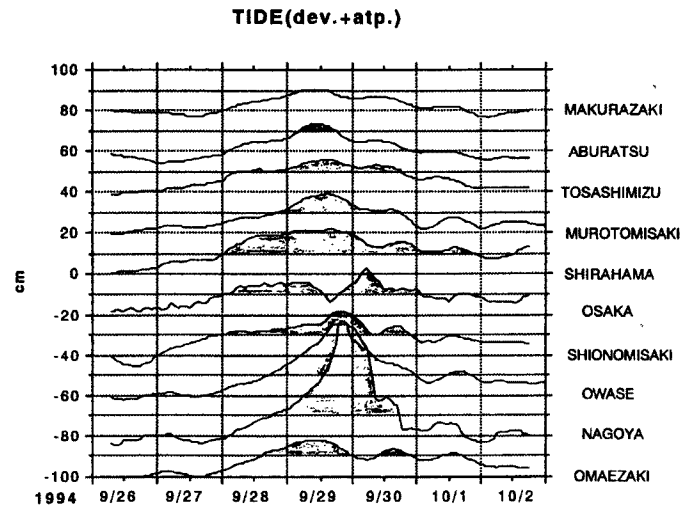


Fig. 12. Anomaly adjusted with atmospheric pressure at the coast from Kyushu to Chubu Districts. Shadow area indicates higher than 10 cm.

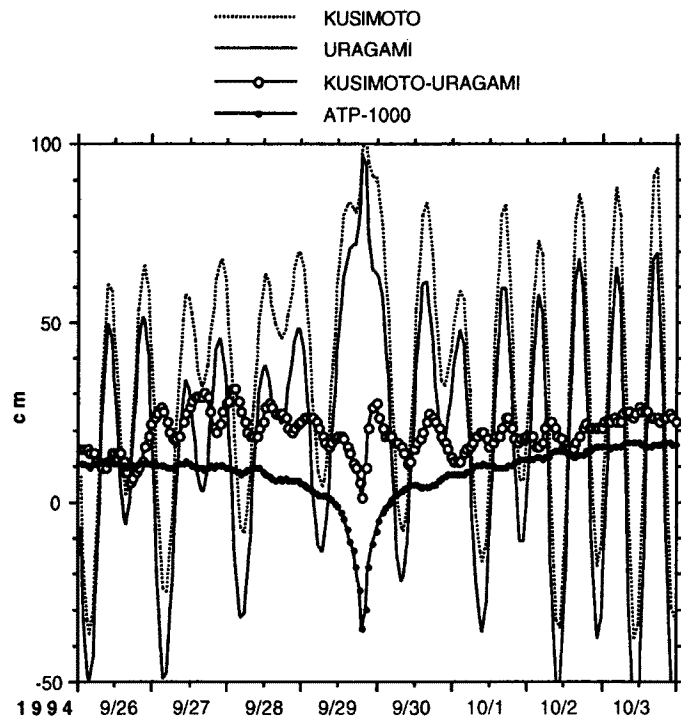


Fig. 13. Observed tides at Shionomisaki and Urugami and their difference which shows tidal disturbance induced by Kuroshio with remarkable change on 9/26.

西日本南岸に接岸傾向にあり、とくに9月末が著しかった¹⁰⁾。潮岬の串本と浦神は近接する潮位測定地点であるが、その潮位差は沖の黒潮の変動を反映していると言われている。今回の台風上陸日の3日前にその潮位差にも変動がみられた (Fig. 13)。ちょうど黒潮最接近時で黒潮の擾乱が陸棚水位に変動を起こした直後に台風が襲来したことになる。

4. 高潮の数値シミュレーション

4.1 高潮数値モデル

基礎方程式は水平2次元の長波近似方程式に、海面および海底での摩擦応力、大気圧の傾度力を考慮した運動方程式及び連続式であり、次式で与えられる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(uU)}{\partial x} + \frac{\partial(vU)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + fV + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial U}{\partial y} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(uV)}{\partial x} + \frac{\partial(vV)}{\partial y} = -gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - fU + \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $z(x, y, t)$ ：静水面から自由水面までの高さ、 $h(x, y, t)$ ：静水深、 $U(x, y, t)$ 、 $V(x, y, t)$ ： x, y 方向の単位幅当りの流量、 $u(x, y, t)$ 、 $v(x, y, t)$ ： x, y 方向の流速、 g ：重力加速度、 f ：コリオリの係数、 τ_{bx} 、 τ_{by} ： x, y 方向の海底面でのせん断応力、 τ_{sx} 、 τ_{sy} ： x, y 方向の自由表面上でのせん断応力（主に台風などによって生じるもの）、 p ：大気圧低下量の水柱換算値、 ρ ：水の密度、および K ：水平方向の運動量の渦拡散係数である。

離散モデルは、基礎方程式を移流計算、水平拡散計算および伝播計算の3ステップの時間分割計算とする数値モデルである。このプログラムコードは、山下ら⁶⁾によるもので、各項を最も適した計算スキームを用いて数値計算できるように設計されている。すなわち、移流計算には高次の特性曲線法 (Two-Point Fourth Order 法) を、水平拡散計算には ADI 法 (交互陰解法) を、伝播計算には Iterative ADI 法 (繰返し交互陰解法) を用いている。

4.2 台風モデル

ハリケーンや台風などの極度に発達した熱帯性低気圧は、同心円状の気圧分布を仮定して、指数関数による減衰曲線でモデル化される。実際には、進行方向に対しての歪（左右の非対象性）や2つの渦中心が存在することもあるが、おおむねこの関数で気圧分布は近似できるようである。問題は風速分布であり、これには地球表面の粗度や気流の渦動粘性係数の他、光田らによれば、中心付近での強風域の存在 (super gradient wind) などを考慮したモデル化が必要となる。すなわち、台風内の気流運動を記述する方程式において、鉛直分布、移流の影響を無視して傾度風のみを計算し、これと風域場が移動する速度をベクトルの足し合わせれば、摩擦を考慮しない場合の風場 (FFW: Friction Free Wind) が計算される。移動座標系における地上風の流跡線の曲率は静止状態での傾度風の勾配と移動速度とのやや複雑な関数とな

り、これを直接計算するか、近似するかでモデルが異なる。最も本質的な点は、地上での摩擦をどのように評価するかであり、これにより FFW と地上風との偏角が決まる。藤田のモデルおよび光田・藤井モデルでは、偏角を経験的に固定し（例えば、 30° ）、地上風の流跡線の曲率も経験的に関数で近似している。ここでは super gradient wind の効果を取り入れた以下に示すような光田・藤井のモデルを用いた。

気圧分布は Schloemer の定式化を用いる。

$$p = p_c + \Delta p e^{(-r_m/r)} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 p ：台風域内の気圧、 p_c ：台風中心の気圧、 Δp ：台風中心と周辺の気圧の差、 r ：台風中心からの距離、 r_m ：台風の最大風速半径である。

傾度風は次式で計算される。

$$V_{gr} = -\frac{rf}{2} + \sqrt{\left(\frac{rf}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r}} \dots\dots\dots (5)$$

地上風の流跡線の曲率半径 r_t は、Blaton の公式により次式で与えられる。

$$\frac{1}{r_t} = \frac{1}{r} \left(1 - \frac{C}{V_{gr}} \sin \alpha \right) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 α は台風の進行方向を基準に反時計回りに定義した計算点の角度である。

台風域内の地表風速と傾度風との比の値は一定ではなく、台風の眼付近で大きくなる super gradient wind の特性を定式化するため、Weibull 分布型の強調関数 $G(x)$ を用いる。

$$G(x) = G(\infty) + \{G(x_p) - G(\infty)\} \left(\frac{x}{x_p}\right)^{k-1} \cdot \exp \left[\left(1 - \frac{1}{k}\right) \left\{1 - \left(\frac{x}{x_p}\right)^k\right\} \right] \dots\dots\dots (7)$$

ここに、決定すべきパラメーター k , x_p および $G(x_p)$ は台風固有の未定定数であるが、台風 7705 号と 7709 号の観測結果から、 $k = 2.5$, $x_p = 0.5$, $G(x_p) = 1.2$ が得られているので、その値を用いた。また、 $G(\infty)$ は、海面上の風速と傾度風速の比として一般的に用いられている $2/3$ を用い、地表風と FFW との偏角は 30° を用いる。すなわち、最大風速半径の内側で強風域 (super gradient wind) がモデル化され、外縁では傾度風が $2/3$ に弱められている。

本台風の経路、中心気圧は、気象要覧¹⁾の値を用い、最大風速半径 (r_m) を 60 km に、周辺気圧は 1013 Hp に固定した。

4.3 計算領域および境界条件

計算領域は、Fig. 14 で示される範囲で、メッシュ間隔は経度方向 $\Delta x = 1515$ m、緯度方向 $\Delta y = 1827$ m であり、水平動粘性係数は $500 \text{ (m}^2\text{s}^{-1}\text{)}$ とした。計算時間きざみは、 $\Delta t = 10.0$ (s) とした。境界条件は、開境界では気圧低下で見積もられる吸い上げ相当水位を与え、陸境界では完全反射とした。

一般に、台風モデルで与えられた風域場をそのまま用いると海上風を過大評価するので、風速に補正係数を掛けて調整する。今回は高潮観測塔で海上風が観測されているので、それに合うようにこの風速の補正係数を決めて高潮を計算した。Fig. 15 に観測塔で観測された風速、風向の変化と、台風モデルから計算された風速風向の変化を示す。ここでは補正係数を 0.6 にすれば観測値と計算値がよく一致した。この係数を用いて高潮を計算すると、外洋から湾奥にいたる海岸の最大偏差の発生時刻が正確に再現され、水位は forerunner による偏差だけずれた状態が再現された。Fig. 16 に白浜と大阪の潮位偏差の観測値と計算値を示す。計算値は観測値とちょうど forerunner の成分だけずれて変化している。計算は 9 月 29 日 0 時

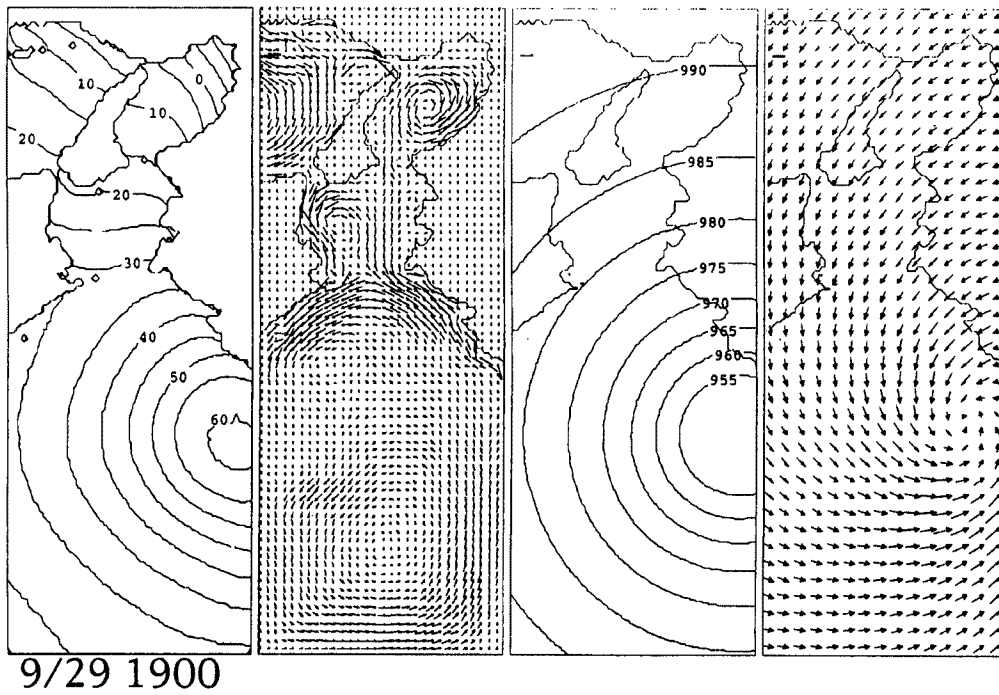


Fig. 14. Distribution of winds, atmospheric pressure, currents and sea level computed by numerical model.

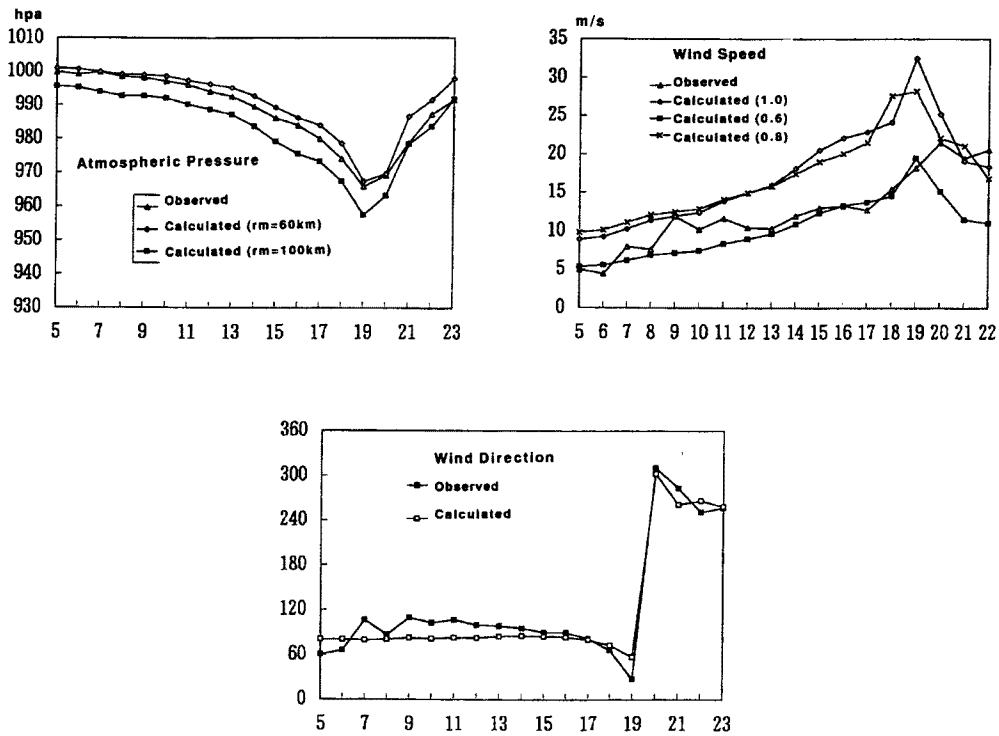


Fig. 15. Comparison of observed atmospheric pressure, wind speed and wind direction at Shirahama.

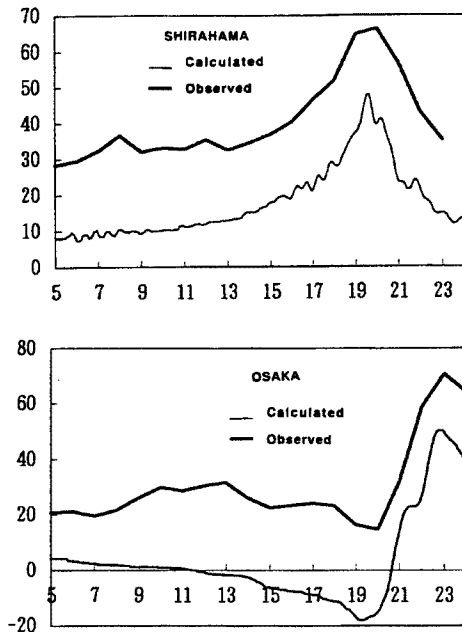


Fig. 16. Comparison of storm surges observed and computed at Shirahama and Osaka.

5. 結 論

以上、伊勢湾台風に似たコースを取った台風 9426 号による高潮について、高潮観測塔でのデータおよび検潮記録による考察を行った。それにより得られた成果は以下のようである。

- (1) 大阪湾よりは伊勢湾に大きな高潮が起きた。田辺湾では吹き寄せによる高潮はおこらず、ほとんど気圧による吸い上げと forerunner によるものであった。forerunner は、高潮の起こる前日より九州から中部地方にかけての広い海域で 20 cm 程度の水位上昇を起こした。
- (2) 台風のコースと気圧の変化を基に 29 日 1 日間の高潮の数値計算を行うと、forerunner の分だけ観測値より低めの計算結果が得られる。さらに 24 hr 前から計算を開始しても結果はほとんどかわらない。
- (3) 黒潮の擾乱が紀伊半島先端を通過した形跡があり、それによって紀伊半島先端を中心とした陸棚域に水位変化が発生して forerunner を形成したと考えられる。

なお、現地観測に際しては、防災研究所潮岬風力実験所の林泰一助手および株式会社カイジョウの技術者の諸氏にご協力をいただいた。また、検潮記録収集に際して、高知県、徳島県、兵庫県、大阪府、和歌山県、三重県、愛知県の土木事務所、神戸海洋气象台、和歌山地方气象台、気象庁海洋気象部および財団法人日本気象協会関西本部、さらに波浪観測記録収集に際して第 3 港湾建設局、第 5 港湾建設局の諸官のご協力を得たことを明記するとともに、高潮数値計算で協力してくれた京都大学大学院 別宮巧君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 山下隆男：高潮とその数値シミュレーション，水工学シリーズ，94-B-1，1994，pp. 1-20
- 2) 中村重久・芹沢重厚：田辺湾で観測された台風時の流れ，うみ（日仏海洋学会誌），第 22 巻 3-4

- 号, 1984, pp. 124 - 130
- 3) 土屋義人・中村重久・山下隆男・岡 扶樹: 台風 7916 号による大阪湾・紀伊水道の高潮, 京都大学防災研究所年報, 第 24 号 B, 1981, pp. 475 - 484
 - 4) 山下隆男・土屋義人・山中久生・光田 寧: 台風 9119 号による瀬戸内海の高潮の追算, 海岸工学論文集, 40, 1993, pp. 206 - 210
 - 5) 山下隆男・土屋義人・藤井 健: 1991 年のサイクロンによるバングラデシュの高潮の数値計算, 海岸工学論文集, 39, 1992, pp. 236 - 240
 - 6) 山下隆男・山中久生・土屋義人: エスチャリーにおける長周期波の数値計算—田辺湾の潮流・吹送流のシミュレーション—, 京都大学防災研究所年報, 第 34 号 B-2, 1991, pp. 449 - 469
 - 7) 山下隆男・土屋義人・吉岡 洋・吉野敏成: 準 3 次元高潮数値モデルとその適用性, 海岸工学論文集, 40, 1993, pp. 211 - 215
 - 8) 林 泰一・吉岡 洋・中村重久・芹沢重厚: 台風 9426 号の強風の観測 (白浜観測塔による測定), 京都大学防災研究所年報, 第 38 号 B-1, 1995, pp. 79 - 84
 - 9) 山下隆男, 山本圭介, 土屋義人: 伊勢湾, 大阪湾, 紀伊水道, 土佐湾における異常潮位, 高潮に及ぼす黒潮の影響, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号 B-2, 1988, pp. 705 - 722
 - 10) 海上保安庁水路部: 海洋速報, 平成 6 年第 19 号
 - 11) 気象庁: 気象要覧, 第 1141 号